

## Comportamiento no lineal de piezocomposites en transductores resonantes de potencia

A. ALBAREDA, J.-H. KAYOMBO, J.A. CASALS Y F. MONTERO DE ESPINOSA<sup>1</sup>

Dept. Física Aplicada. Univ. Politècnica Catalunya. Ed. B4. Campus Nord. c/ Jordi Girona 1-3. 08034 Barcelona.

<sup>1</sup>Inst. Acústica. CSIC. c/ Serrano 144. 28006 Madrid.

Se ha llevado a cabo un estudio comparativo del comportamiento no lineal entre un composite y la piezocerámica con la que ha sido obtenido. Esta caracterización es necesaria para la utilización de los composites en transductores de potencia. Se ha realizado el estudio del aumento de las pérdidas así como el incremento de la rigidez del resonador. El estudio de estos dos fenómenos, así como la posible aparición de la histéresis frecuencial, muestra diferencias importantes en los composites pues sus incrementos no siguen las mismas leyes, sino que son más rápidos en la cerámica que en el composite. Para llevar a cabo este estudio se utilizan dos métodos de medida, destacando las medidas de variación de impedancia mecánica al aumentar la corriente *motional*. Se han normalizado los resultados obtenidos con el fin de hacerlos independientes del tamaño del resonador y poder comparar mejor el composite con la cerámica. La gráfica de la tangente de pérdidas mecánicas  $\text{tg } \delta_m$  en función de las deformaciones medias  $\langle S \rangle$ , muestra que estas pérdidas pueden ser mayores para la cerámica en determinadas condiciones. Se estudia la ley de dependencia tanto del incremento de las pérdidas como de la rigidez, para ambos resonadores.

*Palabras Clave:* Composites, Transductores, Piezocerámica, No linealidad, Pérdidas.

### Non linear behavior of piezocomposites in power resonant devices

A comparative study between the nonlinear behavior of a composite and the piezoceramic, that has been used for it, has been carried out. This characterization is necessary to use the composite in power transducer applications. A study of the changes on the losses and the resonator stiffness has been made. These changes, and also the possibility of the frequency hysteresis, show different behaviors in the composites, because they vary quicker in the ceramics than in the composite. To carry out this study two measurement methods are used, mainly the measurement of the motional impedance increase with the motional current. The results obtained have been normalized in order to make them independent of the resonator size and to make easier the comparison between the composite and the ceramic. The figure of the mechanical losses tangent versus the average strain shows that the losses could be greater in the ceramic than the composite, in certain conditions. The dependence behavior of the losses and stiffness increases versus the average strain has been studied, for both resonators.

*Key words:* Composites, Transducers, Piezoceramic, Non linearity, Losses,

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de composites 1-3 de cerámicas piezoeléctricas en el seno de una resina epoxi se ha generalizado al permitir una mejor adaptación de impedancias entre los transductores y el medio tanto si se trata de la emisión de ultrasonidos en agua o en aire (1-3).

La utilización de composites en transductores de potencia exige su caracterización no lineal, como por ejemplo en aplicaciones de Ensayo No Destructivo (NDT). Esta caracterización es tanto más importante por cuanto estos composites trabajan, en muchos casos, en régimen pulsado, tanto para evitar el calentamiento como, sobre todo, para distinguir mejor entre los distintos ecos recibidos.

Para poder enviar pulsos muy cortos el transductor debe poseer una banda pasante espectral suficientemente ancha, o lo que es lo mismo, un factor de calidad relativamente bajo. Esto determina la utilización de cerámicas con factor de calidad bajo que en principio no son las destinadas a aplicaciones de potencia. Entre otros problemas estas cerámicas "blandas" tienen pérdidas mayores que a su vez se incrementan de una forma importante al aplicar señales elevadas.

Una caracterización completa precisa poder prever su comportamiento tanto con alta señal como en régimen pulsado. En este trabajo exponemos los primeros resultados de comportamiento no lineal en régimen armónico no pulsado, dejando el estudio en régimen pulsado para trabajos posteriores.

Este trabajo utiliza los métodos de medida no lineal ya desarrollados (4-6) en nuestros laboratorios y los aplica a los composites, llevando a cabo una comparación entre los resultados del composite y los de la cerámica piezoeléctrica que ha servido de base para la realización de aquel.

## 2. MEDIDAS NO LINEALES DE COMPOSITES

Se ha llevado a cabo la medida de la no linealidad de composites obtenidos por el Instituto de Acústica del CSIC y realizados con cerámicas piezoeléctricas PZ 27 de Ferroperm. La fracción de cerámica es del 48% y los composites se han realizado por el método de cortar discos cerámicos llenando los huecos con una resina epoxi.

La no linealidad se ha estudiado a partir de las medidas de variación de impedancias (4). Este método consiste en aplicar un barrido de amplitudes crecientes a una frecuencia fija muy próxima a la frecuencia de resonancia, midiendo la impedancia de la muestra para cada valor así como la corriente que circula. Para ello se dispone de la muestra a la salida de un amplificador (NF 4025) que amplifica la señal generada por el Analizador de Impedancias/Redes/Espectros (HP 4195A) que permite también la medida de la impedancia y de la amplitud de la corriente, gracias a una sonda de corriente (Fig. 1). Este método de caracterización es equivalente a llevar a cabo barridos de frecuencia a diferentes niveles de excitación observando, para cada barrido, el valor de las pérdidas y el de la frecuencia de resonancia (6).

Al aumentar el nivel de excitación, la impedancia del composite se desplaza oblicuamente sobre el plano de impedancias  $Z$ , aumentando tanto su parte resistiva  $R$  como la reactiva  $X$  (Fig. 2). Puesto que en resonancia las deformaciones del material son elevadas, nos interesará únicamente la parte mecánica del circuito equivalente del resonador, es decir la formada por los elementos  $R_1$  y  $X_1$ , así como la corriente  $I_1$  que circula por ella, descontando para ello la corriente que circula a través de la capacidad  $C_0$ , por la rama eléctrica (6).

El aumento de la resistencia  $\Delta R_1$  incrementa las pérdidas mecánicas del composite (incluso en un factor 2) disminuyendo el factor de calidad. Por otro lado el incremento de la reactancia  $\Delta X_1$  produce un desplazamiento de la frecuencia de resonancia hacia frecuencias menores. En efecto, para alcanzar con alta señal la resonancia en  $X=0$  es preciso partir de frecuencias inferiores. La conjunción de ambas variaciones puede producir fenómenos de histéresis que pueden ocasionar no alcanzar la resonancia, al hacer un barrido de frecuencias, a no ser que se realice con frecuencias decrecientes.

Un estudio detallado de las variaciones  $\Delta R_1$  y  $\Delta X_1$  para las distintas frecuencias muestra (Fig. 3) que el conjunto de puntos se alinean bien en rectas de pendiente

$$m = \frac{\Delta X_1}{\Delta R_1} \quad [1]$$

la cual es bastante constante para las diferentes frecuencias medidas.

Esta pendiente, que es aproximadamente  $m = 2.3$ , es la que indica cuando se puede producir la histéresis. En nuestro caso al tener un valor relativamente pequeño (en cerámicas duras el valor de  $m$  es del orden de 10) hace que estemos lejos de que se produzca esta histéresis no deseada.

Para profundizar en el comportamiento no lineal del composite se muestran las dependencias de  $\Delta R_1$  y  $\Delta X_1$ , para una frecuencia, con la corriente de excitación. Estas variaciones son, en el caso de cerámicas duras, dependientes del cuadrado de la corriente  $I_1^2$ , sin embargo, en nuestro composite se aproxima mucho a una dependencia lineal con la corriente  $I_1$ , al menos para valores elevados de  $I_1$  (Fig. 4).

Hemos utilizado otra técnica para medir la no linealidad y poder así comparar los resultados. Para ello hemos realizado la intermodulación de dos señales a frecuencias  $f_A$  y  $f_B$  próximas a la resonancia (5). Las medidas de la corriente de intermodulación a las frecuencias  $f_\alpha = 2f_A - f_B$  y  $f_\beta = 2f_B - f_A$  en función de  $\Phi_\alpha = I_A^2 \cdot I_B$  ó  $\Phi_\beta = I_B^2 \cdot I_A$  respectivamente, muestra unas dependencias lineales (Fig. 5). Esta relación es equivalente a decir que las variaciones del módulo de la impedancia son proporcionales al cuadrado de la corriente.

Aparentemente esto está en contradicción con los resultados

anteriores de la figura 4. Sin embargo es de destacar que los valores de la corriente para los que se han realizado las medidas de intermodulación (Fig. 5) son mucho más pequeños: corresponden a corrientes del orden de 25 mA como máximo. Esto es así debido a que este método al ser mucho más sensible no precisa de excitaciones elevadas para producir la intermodulación como un fenómeno no lineal. Si se observa con detalle la figura 4 se puede observar que en la zona que corresponde a corrientes menores a 25 mA la dependencia con la corriente  $I_1$  deja de ser lineal.

Puede decirse a partir de estos dos métodos de medida que la no linealidad del composite tiene dos zonas, para baja señal de excitación la dependencia con la corriente es cuadrática, proporcional a  $I_1^2$ , mientras que para alta señal la dependencia es lineal con la corriente  $I_1$ .

Para poder estudiar mejor el composite y sobre todo para poderlo comparar, tanto con otros composites como con la cerámica de la que se ha partido, es necesario normalizar estos valores a otros que sean independientes del tamaño de la cerámica o del composite. En el caso del composite estos valores normalizados serán valores medios para el conjunto sin matizar si se trata de la cerámica o del epoxi. La normalización utilizada (4, 6) consiste en transformar las variaciones de resistencia en variaciones de la tangente de pérdidas:

$$\Delta \tan \delta_m = \frac{\Delta R_1}{Z} \quad Z = \frac{1}{\omega_s C_1} \quad [2]$$

Las variaciones en la reactancia están relacionadas con la disminución de la frecuencia de resonancia y a su vez con la disminución de la rigidez  $c$  del resonador a través de la velocidad de propagación de la onda acústica (4):

$$\frac{\Delta c}{c_0} = \frac{2\Delta f_s}{f_s} = -\frac{\Delta X_1}{Z} \quad v = \lambda f = \sqrt{c_{33}^D / \rho} \quad [3]$$

Por último, se ha tomado como variable independiente la deformación media  $\langle S \rangle$  del material en vez de la corriente *motional*  $I_1$  (6):

$$\langle S \rangle = \frac{I_1}{A\omega_s \sqrt{M}} \quad M_{33} = e_{33}^2 \quad [4]$$

Donde  $A$  es el área de los electrodos,  $\omega_s$  la frecuencia angular de la resonancia y  $M$  el factor de mérito.

Después de llevar a cabo esta transformación obtenemos el siguiente ajuste polinómico entre las magnitudes citadas:

$$\Delta \tan \delta_m = \alpha_1 \langle S \rangle + \alpha_2 \langle S \rangle^2 \quad [5]$$

$$\left[ \frac{\Delta c}{c_0} \right] = \beta_1 \langle S \rangle + \beta_2 \langle S \rangle^2 \quad [6]$$

siendo estos coeficientes los que nos permitirán comparar el composite con la cerámica (Tabla I).

### 3. COMPARACION ENTRE COMPOSITES Y CERAMICAS

Se ha procedido a la caracterización no lineal de la cerámica PZ 27 con la cual se ha elaborado el composite. De entrada aparece una dificultad pues el modo de vibración de grosor de

TABLA I: FACTOR DE CALIDAD Y COEFICIENTES NO LINEALES (DEFINIDOS EN EL TEXTO) DE UN COMPOSITE Y DE UN RESONADOR PIEZOCERÁMICO (FERROPERM PZ 27), DEL MISMO MATERIAL CON EL QUE SE HA REALIZADO EL COMPOSITE.

	Q	m	$\alpha 1$ ·(10 <sup>6</sup> )	$\alpha 2$	$\beta 1$ ·(10 <sup>6</sup> )	$\beta 2$	nr	nc
Cerámica	75.5	1.7	326	72	717	92	1.39	1.30
Composite	38.7	2.3	352	2.4	776	6.5	1.07	1.05

esta cerámica (disco de 2 cm de diámetro y 5 mm de grosor) no es su primer modo (como ocurre en el composite) sino que aparecen resonancias radiales y sus armónicos que se mezclan con el de grosor. Para hacer la caracterización correctamente hemos utilizado otra cerámica del mismo material pero con un factor de forma más favorable (más delgada) evitando así la superposición de modos. El inconveniente de esta opción es que la frecuencia de esa resonancia es mucho más elevada que la del composite. Ello ha generado una cierta dificultad para poder comparar los resultados en ambos resonadores, pues será difícil que las deformaciones sean similares.

El estudio de esta cerámica muestra un comportamiento bastante similar al encontrado en otras cerámicas en su aspecto cualitativo: tanto las variaciones de las pérdidas como las de la rigidez son aproximadamente cuadráticas, o en todo caso más cuadráticas que las del composite.

La Tabla I muestra los valores de los ajustes polinómicos aplicados a la cerámica comparándolos con los encontrados para el composite. La figura 6 muestra en escala doble logarítmica la dependencia de la tangente de pérdidas así como la variación relativa de la rigidez en función de las deformaciones medias. En ella se puede comparar adecuadamente los comportamientos no lineales de ambos resonadores. Puede observarse como la pendiente  $n_r$  de los incrementos de la tangente de pérdidas, y  $n_c$  de las variaciones del módulo de la rigidez, son mayores en la cerámica que las correspondientes pendientes del composite (aproximadamente un 30% mayor) (Tabla I).

$$\Delta \lg \delta_n = a < S >^{n_r} \quad \frac{[\Delta c]}{c_0} = b < S >^{n_c} \quad [7]$$

Por último la figura 7 muestra los valores absolutos de la tangente de pérdidas, en vez de sus incrementos. Se observa claramente como la cerámica al poseer un factor de calidad mayor tiene unas pérdidas menores que el composite. La no linealidad de ambos resonadores nos muestra que el incremento de las pérdidas es más rápido en la cerámica, por lo que, de confirmarse la extrapolación de la Fig. 7, podría existir un valor a partir del cual las pérdidas de la cerámica fuesen mayores que las del composite. Puesto que esta zona es la que previsiblemente será utilizada en aplicaciones de potencia, este resultado avalaría la opción del composite como un dispositivo con mejores prestaciones.

#### 4. CONCLUSIONES

El utilizar una gráfica doble logarítmica donde se refleje la variación de la tangente de pérdidas y la variación relativa de la rigidez en función de la deformación media no solamente aporta una buena información sobre el composite sino que permite un buen estudio comparativo entre composite y cerámica.

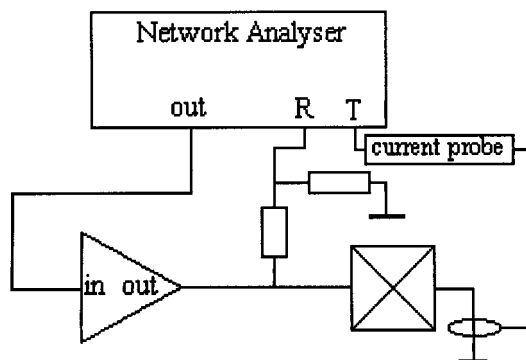


Figura 1: Montaje experimental.

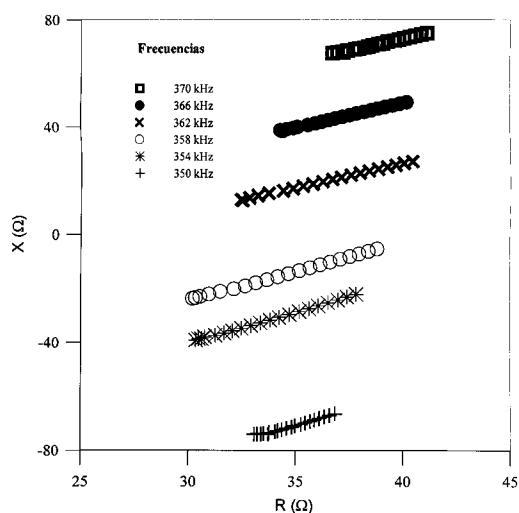


Figura 2: Impedancia (resistencia y reactancia) del composite para valores crecientes de la señal de excitación y para 6 frecuencias fijas, próximas a la resonancia.

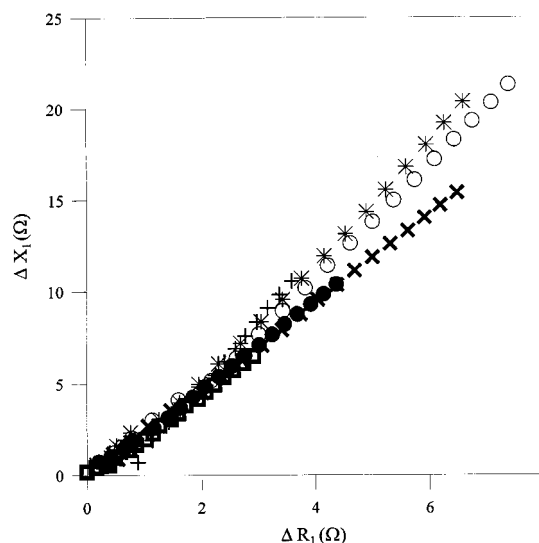


Figura 3: Incrementos de la reactancia motional  $\Delta X_1$  en función de los incrementos de la resistencia motional  $\Delta R_1$ , para varias frecuencias (las indicadas en la Fig. 2).

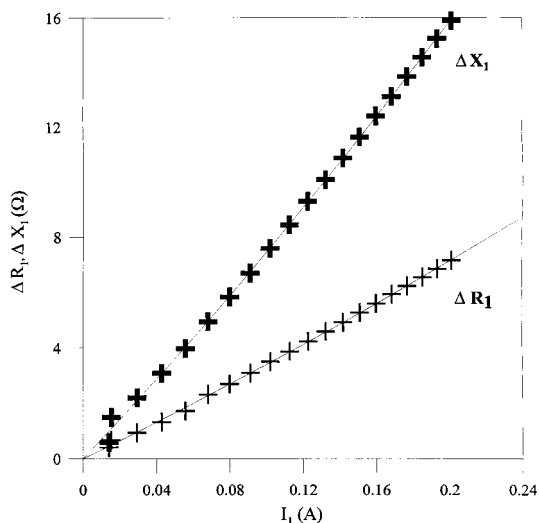


Figura 4: Incremento de la reactancia  $\Delta X_1$  y de la resistencia  $\Delta R_1$  en función de la corriente motional  $I_1$ , para el composite.

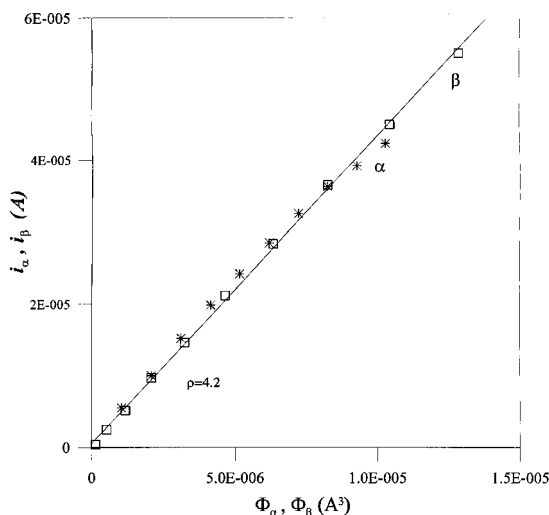


Figura 5: Medida de las corrientes de intermodulación  $I_\alpha$  (\*),  $I_\beta$  (□) en función de  $\Phi_\alpha$ ,  $\Phi_\beta$ .

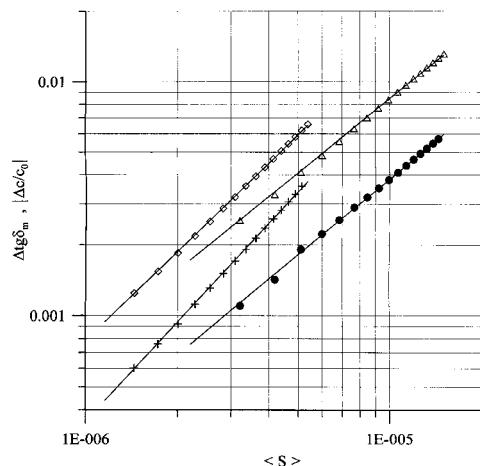


Figura 6: Incrementos de la tangente de pérdidas  $\Delta$  y del módulo de la rigidez  $\Delta$  en función de las deformaciones medias  $\langle S \rangle$ , para el composite  $\Delta$  y la cerámica  $\square$ .

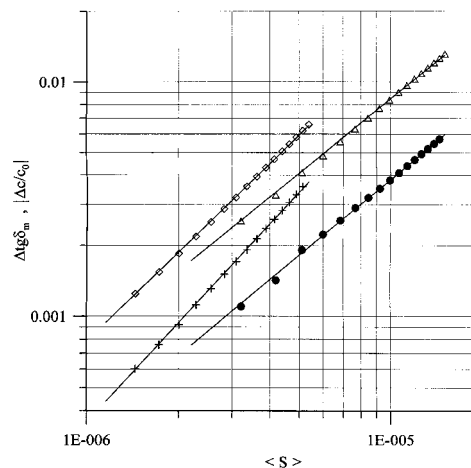


Figura 7: Tangente de pérdidas para el composite (●) y la cerámica (+) en función de las deformaciones medias  $\langle S \rangle$ .

mica. Esta gráfica muestra los valores alcanzados así como las dependencias lineales o cuadráticas de estas variables.

El estudio comparativo entre composite y cerámica muestra que el factor de calidad disminuye en el composite, pero que las pérdidas mecánicas son menos importantes con señal elevada, pues crecen más lentamente. A pesar de las dificultades en la realización de una comparación rigurosa, el estudio del valor absoluto de las pérdidas nos da un amplio conocimiento de su comportamiento en dispositivos de potencia, pudiendo existir zonas donde las pérdidas del composite fuesen menores que las de la cerámica. Todo ello debe permitir optimizar los materiales empleados en el composite.

El hecho de que la pendiente  $m$  de las curvas de variación de impedancia sea mayor en el composite hace que pueda aparecer antes la histéresis frecuencial. Sin embargo, como los valores encontrados de esta pendiente son relativamente pequeños, puede suponerse que, en la utilización de los composites en dispositivos de potencia, serán más importantes otros factores.

Queda abierto el camino para iniciar el estudio de la no linealidad en régimen pulsado y no armónico, tal como ocurre en su utilización. Igualmente se abre la perspectiva de aplicar este método de caracterización a otras cerámicas o bien a otras resinas epoxi y poder así dilucidar la más apropiada a la aplicación deseada.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la ayuda de la CICYT, proyectos nº TAP98—C03-02 y TAP98-0911-C03-01.

## BILIOGRAFIA

1. T.E. Gómez Álvarez-Arenas, F.R. Montero de Espinosa Freijo. "Piezocomposites of complex microstructure: Theory and experimental assesment of the coupling between phases". IEEE Trans. UFFC, Vol 44, N1,208-217,(1997)
2. F. Rodríguez, T. Gómez, F. Montero de Espinosa. "Simulación de composites piezoeléctricos". Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, 37 (2-3) 184-186., (1998)
3. S. Sánchez, F.R. Montero de Espinosa, N. Lamberti. "Multifrequency piezoelectric composites: one dimensional modeling". ULTRASONICS, 37 (1999) 97-105.
4. R. Pérez, A. Albareda. "Analysis of nonlinear effects in a piezoelectric resonator". J. Acous. Soc. Am. 100 (6) 3561-3570, (1996).
5. A. Albareda, R. Pérez, J.L. Villar, E. Minguela y J.A. Gorri. "Intermodulation measurement of nonlinearities in piezoceramic resonators". Rev. Sci. Instrum. 68(8), 3143-3149. (1997).
6. P. Gonnard, V. Perrin, R. Briot, D. Guyomar y A. Albareda. "Characterization of the Piezoelectric Ceramic Mechanical Nonlinear Behavior". Proc. of IEEE, ISAF'98. (1998).